

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Факультет приборостроения, информационных технологий и электроники



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ПИ

Д. В. Артамонов

*октябрь* 2014г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

### КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ФТД.1.3

Направление подготовки: **03.06.01 — «Физика и астрономия»**

Направленность (профиль) **Физика полупроводников**

Квалификация: **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

Форма обучения: **очная**

Рабочая программа составлена в соответствии с ФГОС ВО по направлению 03.06.01 — «Физика и астрономия» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (уровень подготовки кадров высшей квалификации)

Программу составил:

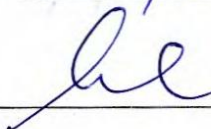
Грунин А. Б., д. ф.-м. н., профессор



Программа обсуждена на заседании кафедры «Физика»

Протокол № 1.1 от « 1 » октября 2014 года

Зав. кафедрой



Семенов М. Б.

Программа согласована с деканом факультета ФПИТЭ

Декан факультета



Кревчик В. Д.

Программа одобрена методической комиссией факультета ФПИТЭ

Протокол № 1

от « 1 » октября 2014 года

Председатель методической комиссии факультета ФПИТЭ



Задера А. В.

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры - разработчика программы.**

## **1. Цели и задачи дисциплины, ее место в системе подготовки аспиранта, требования к уровню освоения содержания дисциплины**

### **1.1. Цели и задачи изучения дисциплины**

**Цель изучения дисциплины** – анализ имеющихся методов создания и исследования твердотельных структур, а также создание для будущих преподавателей и исследователей научной и методической базы, позволяющей им в своей профессиональной деятельности использовать полученные знания.

#### **Задачи дисциплины:**

- изучить структуру, свойства и область применения основных наноструктур и наноматериалов в технике, медицине, биологии, вычислительной технике, охране окружающей среды;
- изучить методы создания наноразмерных сверхпроводниковых и полупроводниковых структур, основы тонкопленочной технологии и микроэлектроники, особенности применения сверхпроводниковых и полупроводниковых наноструктур в электронике;
- изучить проблемы, связанные с развитием квантовой теории твердого тела;
- изучить методы расчета примесных состояний в полупроводниковых наноструктурах, включая примесные состояния молекулярного типа;
- изучить методы расчета спектров примесного и внутризонного поглощения света в полупроводниковых наноструктурах;
- изучить методы расчета спектров фотолюминесценции в квантовых ямах и квантовых точках, содержащих мелкие акцепторные центры;
- изучить метод потенциала нулевого радиуса и адиабатическое приближение, метод функций Грина и методы теории возмущений, вариационные методы»;
- освоение компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО, подготовка к сдаче экзамена кандидатского минимума.

### **1.2. Место дисциплины в структуре ООП аспиранта**

Дисциплина «Квантовая теория» относится к модулю «Факультативы» учебного плана ООП по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия, профилю – Физика полупроводников.

Научно-исследовательская работа аспиранта осуществляется в каждом семестре всего периода обучения.

### **1.3.Связь с предшествующими и последующими дисциплинами**

Курс предполагает наличие у аспирантов знаний по курсам «Методы и средства информатики и вычислительной техники в современных научных исследованиях», «Основы полупроводниковой наноэлектроники», «Физические основы оптики полупроводниковых наноструктур». Знания и навыки, полученные аспирантами при изучении данного курса, могут быть

применены при подготовке и написании диссертации по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

## 2. Компетенции аспиранта, формируемые в результате освоения программы педагогической практики

Процесс педагогической практики направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО по данному направлению подготовки:

Коды компетенции	Наименование компетенции	Структурные элементы компетенции (в результате освоения дисциплины обучающийся должен знать, уметь, владеть)
1	2	3
ПК-6	Способность использовать в теоретических и экспериментальных исследованиях достижения современной квантовой теории, а также разрабатывать и применять современные перспективные приборы нанoeлектроники и фотоники.	<p><b>Знать:</b> структуру, свойства и применения основных наноструктур и наноматериалов в технике, медицине, биологии, вычислительной технике.</p> <p><b>Уметь:</b> применять теоретические и экспериментальные методы исследования квантовой теории к расчетам характеристик полупроводниковых структур.</p> <p><b>Владеть:</b> современными методами теоретических и экспериментальных исследований свойств наноматериалов для разработки современных приборов нанoeлектроники и фотоники.</p>
ПК-7	Способность свободно владеть фундаментальными разделами квантовой физики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач.	<p><b>Знать:</b> методы создания наноразмерных сверхпроводниковых и полупроводниковых структур, основы тонкопленочной технологии и микроэлектроники, особенности применения сверхпроводниковых и полупроводниковых наноструктур в электронике.</p> <p><b>Уметь:</b> обобщать знания, полученные при изучении программных курсов по физике и данного курса.</p> <p><b>Владеть:</b> фундаментальными разделами квантовой физики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач.</p>
ПК-8	Способность использовать знания современной квантовой теории для решения прикладных задач физики низкоразмерных систем	<p><b>Знать:</b> современные проблемы, связанные с развитием квантовой теории твердого тела.</p> <p><b>Уметь:</b> использовать принципы, модели и законы квантовой теории для решения прикладных задач физики низкоразмерных систем.</p> <p><b>Владеть:</b> методом потенциала нулевого радиуса и адиабатическим приближением, методом функций Грина и методами теории возмущений, вариационными методами.</p>

### 3. Структура и содержание дисциплины «Квантовая теория»

#### 3.1. Структура дисциплины «Квантовая теория»

Общая трудоемкость дисциплины 2 зачетные единицы, 72 часов, в т.ч. 54 часА подготовки к зачету.

№ п / п	Наименование разделов и тем дисциплины (модуля)	Семестр	Недели семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Формы текущего контроля успеваемости (неделя)	
				Аудиторная работа			Самостоятельная Работа				
				Всего	Лекция	Практические занятия	Всего	Подготовка к семинару	Подготовка к зачету		Оценка работы на семинаре
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	<b>Раздел 1. Энергетический спектр кристаллов</b>										
	<b>Тема 1.1</b> Фононы.	7	1	1	1		4		4		1
	<b>Тема 1.2</b> Зонная структура твердого тела и методы ее расчета.	7	2-3	1	1		5		5		2
	<b>Раздел 2. Электронные кинетические свойства твердых тел</b>										
	<b>Тема 2.1</b> Кинетическое уравнение.	7	4	2	2		5		5		4
	<b>Тема 2.2</b> Электронная структура полупроводников.	7	5-6	1	1		5		5		5
	<b>Раздел 3. Механические, оптические и магнитные свойства твердых тел</b>										
	<b>Тема 3.1</b> Упругая деформация.	7	7	1	1		5		5		7
	<b>Тема 3.2</b> Оптические спектры молекулярных кристаллов.	7	8	2	2		5		5		8
	<b>Тема 3.3</b> Диамагнетизм свободного электронного газа.	7	9	1	1		5		5		9
	<b>Раздел 4. Эмиссионные явления в твердых телах.</b>										

<b>Тема 4.1</b> Автоэлектронная эмиссия.	7	10	2	2		5		5	10
<b>Тема 4.2</b> Фотоэлектронная эмиссия.	7	11	1	1		5		5	11
<b>Тема 4.3</b> Вторично-электронная эмиссия.	7	12	1	1		5		5	12
<b>Раздел 5. Электронные и атомные явления на поверхности и на межфазовых границах твердых тел</b>									
<b>Тема 5.1</b> Электронные состояния на поверхности твердых тел.	7	13	1	1		5		5	13
<b>Тема 5.2</b> Физическая природа и описание области пространственного заряда в полупроводниках на границах раздела.	7	14-15	2	2		5		5	14
<b>Раздел 6. Физика дисперсных систем</b>									
<b>Тема 6.1</b> Вынужденная анизотропия во внешних электрических полях.	7	16-17	1	1		5		5	16
<b>Тема 6.2</b> Основные свойства и методы получения дисперсных систем.	7	18	1	1		5		5	18
<b>Общая трудоемкость, в часах</b>			<b>18</b>	<b>18</b>	<b>–</b>	<b>54</b>	<b>–</b>	<b>54</b>	Пром. аттест.
									Форма
									Зач
									Экз

## **3.2. Содержание дисциплины (Квантовая теория)**

### **Раздел 1. Энергетический спектр кристаллов**

#### **Тема 1.1 Фононы**

Колебания решетки - фононы. Акустическая и оптическая ветви колебаний. Теплоемкость решетки. Дебаевская частота. Фактор Дебая-Валлера в рассеянии рентгеновский лучей. Ангармонизм и тепловое расширение.

#### **Тема 1.2 Зонная структура твердого тела и методы её расчета**

Влияние симметрии на зонную структуру твердого тела. Метод ячеек. Метод почти свободных электронов. Метод ортогонализированных плоских волн. Метод присоединенных плоских волн. Метод функций Грина. Метод псевдопотенциала.

### **Раздел 2. Электронные кинетические свойства твердых тел**

#### **Тема 2.1 Кинетическое уравнение**

Кинетическое уравнение Больцмана. Электро- и теплопроводность. Времена релаксации. Механизмы рассеяния электронов. Рассеяние на примесях и дефектах. Электрон-фононное рассеяние. Нормальные процессы, процессы переброса. Магнитосопротивление и эффект Холла.

#### **Тема 2.2 Электронная структура полупроводников**

Полупроводники. Электронная структура типичных полупроводников. Германий и кремний. Узкозонные полупроводники. Примесные уровни. Доноры и акцепторы. Статистика электронов и положение Ферми-уровня в невырожденных полупроводниках - собственном и примесных. Рассеяние свободных носителей тока в полупроводниках. Подвижность и длина свободного пробега носителей тока. Электропроводность полупроводников. Явления в сильных электрических полях. Термоэлектрические явления в полупроводниках. Гальвано- и термомагнитные эффекты. Неравновесные носители тока. Распределение неравновесных носителей тока в полупроводниках. Квазиуровни Ферми и статистика заполнения уровней дефектов. Особенности переноса неравновесных носителей тока. Диффузия неравновесных носителей тока и их дрейф в электрическом поле.

### **Раздел 3. Механические, оптические и магнитные свойства твердых тел**

#### **Тема 3.1 Упругая деформация**

Тензор упругих постоянных и упругая деформация. Пластичность кристаллов. Предел текучести. Упрочение. Внутреннее трение.

#### **Тема 3.2 Оптические спектры молекулярных кристаллов**

Оптические спектры молекулярных кристаллов. Экситонное поглощение. Правило Урбаха. Механизмы и эффективность переноса энергии. Спектры и квантовый выход люминесценции.

#### **Тема 3.3 Диамагнетизм свободного электронного газа**

Диамагнетизм свободного электронного газа. Спиновый парамагнетизм. Закон Кюри. Ферромагнетизм. Молекулярное поле Вейсса.

Обменное взаимодействие. Ферромагнитные домены. Энергия анизотропии. Доменная стенка. Антиферромагнетики. Ферриты.

#### **Раздел 4 Эмиссионные явления в твердых телах**

##### **Тема 4.1. Автоэлектронная эмиссия**

Автоэлектронная эмиссия. Теория Фаулера-Норгейма. Распределение электронов по энергиям. Особенности автоэлектронной эмиссии полупроводников. Автоэлектронная микроскопия. Взрывная эмиссия электронов. Эмиссия электронов из системы металл- диэлектрик- металл. Сканирующая туннельная микроскопия. Микроскоп атомных сил.

##### **Тема 4.2 Фотоэлектронная эмиссия**

Фотоэлектронная эмиссия. Теория Фаулера. Взаимодействие света с веществом. Особенности фотоэлектронной эмиссии с полупроводников и щелочно-галлоидных кристаллов, экситоны. Фотоэлектронная спектроскопия.

##### **Тема 4.3 Вторично-электронная эмиссия**

Вторично-электронная эмиссия. Механизмы взаимодействия электронов с твердым телом. Упругое и неупругое рассеяние, длина свободного пробега. Распределение вторичных электронов по энергии. Дифракция электронов. Характеристические потери энергии электронов. Электронная Оже-спектроскопия. Спектроскопия потенциалов появления.

#### **Раздел 5. Электронные и атомные явления на поверхности и на межфазовых границах твердых тел**

##### **Тема 5.1 Электронные состояния на поверхности твердых тел**

Электронные состояния на поверхности. Поверхностные состояния. Поверхностная зона Бриллюэна. Пространственное распределение потенциала и электронной плотности на поверхности металла, осцилляции Фриделя. Работа выхода и ее составные части.

##### **Тема 5.2 Физическая природа и описание области пространственного заряда в полупроводниках на границах раздела**

Физическая природа и описание области пространственного заряда в полупроводниках на границах раздела. Распределение электрических зарядов в приповерхностной области полупроводников. Поверхностная емкость полупроводников. Кинетические и неравновесные явления в полупроводниках с учетом поверхности и границ раздела. Контакт металл-полупроводник, гомопереходы, гетеропереходы. Полевые эффекты в полупроводниках и их использование для исследования поверхностных явлений.

#### **Раздел 6. Физика дисперсных систем**

##### **Тема 6.1 Вынужденная анизотропия во внешних электрических полях**

Вынужденная анизотропия во внешних электрических полях. Электрическое двойное лучепреломление газов и жидкостей, способы его наблюдения, константа Керра. Классическая и квантовая теории эффекта Керра. Эффект Фойхта и его связь с эффектом Керра. Электрооптические эффекты в растворах макромолекул. Способы расчета стационарного ЭДЛ



жесткоцепных полимеров в слабом поле. Расчет нестационарного ЭДЛ при включении поля. Расчет нестационарного ЭДЛ при выключении поля. ЭДЛ в слабом синусоидальном поле. Электрические эффекты в коллоидных дисперсных системах. Расчет стационарных электрооптических эффектов дисперсных систем в поле произвольной величины. Влияние полидисперсности на электрооптические эффекты.

### **Тема 6.2 Основные свойства и методы получения дисперсных систем**

Основные свойства и методы получения дисперсных систем. Термодинамика пограничного слоя. Основные электрокинетические явления. Модель Гельмгольца исследуемых веществ. Динамический ЯМР. ЯМР-релаксация в жидкостях: основы теории, связь с молекулярной подвижностью.

### **3.3. Особенности организации изучения дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья**

Организация изучения дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется в соответствии с:

1. ст.79, 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»

2. Раздел IV, п.п. 46-51 приказа Минобрнауки России от 19.11.2013 № 1259 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре)»

3. Методические рекомендации по организации образовательного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в образовательных организациях высшего образования, в том числе оснащенности образовательного процесса (утверждены заместителем Министра образования и науки РФ А.А.Климовым от 08.04.2014 г. № АК-44/05 вн)

### **4. Образовательные технологии**

В ходе освоения дисциплины «Квантовая теория» при проведении аудиторных занятий используются следующие образовательные технологии:

1. Технология развития критического мышления реализуется в ходе проведения следующих видов учебной работы:

1.1. *Проблемные лекции*, которые предполагают диалоговый тип лекционного преподавания, предметом которого выступает вводимый лектором материал и система познавательных задач, отражающих основное содержание темы. В виде проблемных лекций реализуется темы 1.1, 2.1, 3.1, 4.1.

1.2. *Семинары-круглые столы*, в ходе которых происходит групповое обсуждение аспирантами учебной проблемы под руководством преподавателя. В ходе проведения круглого стола аспиранты приобретают навыки устного изложения заранее подготовленного материала, умение

выслушивать коллег-сокурсников, делать заключения. В виде семинаров-круглых столов реализуются темы 1.2, 2.2, 3.2, 4.2, 5.1.

1.3. *Семинары-дискуссии*, в ходе которых обсуждается проблемная ситуация, поставленная преподавателем, а аспиранты защищают различные точки зрения на поставленную проблему. В ходе проведения дискуссии аспиранты приобретают умение излагать и аргументировано отстаивать точку зрения, обоснованно критиковать оппонентов, сопоставлять различные подходы к решению проблемной ситуации, делать выводы. В виде семинаров-дискуссий реализуются темы 3.3, 4.3, 5.2, 6.1, 6.2.

2. Медиатехнология реализуется в ходе проведения следующих видов учебной работы:

2.1. *Проблемные лекции*, в ходе которых используются презентации, выполненные в среде Power-Point, и содержащие иллюстрации приводимых положений, видео-фрагменты, элементы работы математических моделей – симуляций экологических закономерностей. В виде проблемных лекций с использованием медиатехнологий реализуется темы 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1, 6.1.

2.2. *Семинары-круглые столы*, в ходе которых аспиранты делают краткие сообщения по рассматриваемой проблематике с использованием презентации. В результате использования этой технологии аспиранты учатся лаконично и ярко представлять информацию в аудитории. В виде семинаров-круглых столов с использованием медиатехнологий реализуются темы 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 4.2, 5.1, 6.1.

3. Кейс-технология реализуется в ходе проведения следующих видов учебной работы:

3.1. *Семинары-дискуссии*, в ходе которых в качестве одной из технологий используются такие приемы как мозговой штурм и дебаты. Мозговой штурм позволяет, используя групповую форму работы смоделировать процесс получения абсолютно новых для аспирантов знаний. Дебаты позволяют сопоставлять существующие в экологии сообществ и экосистем противоположные подходы для решения одной и той же проблемы. В виде семинаров-дискуссий с использованием кейс-технологий реализуются темы 1.2, 2.2, 3.2, 3.3, 4.3, 5.2, 6.2.

При организации самостоятельной работы используются следующие технологии:

1. Технология систематизации имеющейся информации (работа с конспектом лекции для подготовки к экзамену; темы 1.1 – 6.2)

2. Технология поиска и сбора новой информации (работа на компьютере с целью поиска информации в базах данных, работа с учебной, справочной и научной литературой с целью подготовки к семинарам: темы 1.1 – 6.2);

3. Технология анализа и представления новой информации (работа по подготовке устных сообщений на семинарах-круглых столах (темы 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 4.2, 5.1, 6.1), по подготовке для выступлений презентациями на семинарах-дискуссиях (темы 1.2, 2.2, 3.2, 3.3, 4.3, 5.2, 6.2.), по подготовке к экзамену).

В целях реализации индивидуального подхода к обучению аспирантов, осуществляющих учебный процесс по собственной траектории в рамках индивидуального рабочего плана, изучение данной дисциплины базируется на следующих возможностях: обеспечение внеаудиторной работы с аспирантами, в том числе в электронной образовательной среде с использованием соответствующего программного оборудования, дистанционных форм обучения, возможностей интернет-ресурсов, индивидуальных консультаций.

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов**

### **5.1. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости:**

#### ***Виды самостоятельной работы по темам:***

**Тема 1.1.** *Подготовка к семинару-круглому столу (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).*

#### ***Примерные вопросы семинара:***

1. Колебания решетки - фононы. Акустическая и оптическая ветви колебаний. Теплоемкость решетки.
2. Теплоемкость решетки. Дебаевская частота. Фактор Дебая-Валлера в рассеянии рентгеновский лучей. Ангармонизм и тепловое расширение..

**Тема 1.2.** *Подготовка к семинару-дискуссии (2 часа). Подготовка к экзамену (2 часа).*

#### ***Примерные вопросы семинара:***

1. Влияние симметрии на зонную структуру твердого тела.
2. Метод ячеек
3. Метод почти свободных электронов.
4. Метод ортогонализированных плоских волн. Метод присоединенных плоских волн.
5. Метод функций Грина.
6. Метод псевдопотенциала.

**Тема 2.1.** *Подготовка к семинару-круглому столу (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).*

#### ***Примерные вопросы семинара:***

1. Кинетическое уравнение Больцмана. Электро- и теплопроводность. Времена релаксации. Механизмы рассеяния электронов. Рассеяние на примесях и дефектах. Электрон-фононное рассеяние.
2. Магнитосопротивление и эффект Холла.

**Тема 2.2** *Подготовка к семинару-дискуссии (2 часа). Подготовка к экзамену (2 часа).*

#### ***Примерные вопросы семинара:***

1. Электронная структура типичных полупроводников. Германий и кремний. Узкозонные полупроводники. Примесные уровни. Доноры и акцепторы.

2. Статистика электронов и положение Ферми-уровня в невырожденных полупроводниках - собственном и примесных. Рассеяние свободных носителей тока в полупроводниках. Подвижность и длина свободного пробега носителей тока. Электропроводность полупроводников.

3. Явления в сильных электрических полях. Термоэлектрические явления в полупроводниках. Гальвано- и термомагнитные эффекты. Неравновесные носители тока. Распределение неравновесных носителей тока в полупроводниках. Квазиуровни Ферми и статистика заполнения уровней дефектов. Особенности переноса неравновесных носителей тока. Диффузия неравновесных носителей тока и их дрейф в электрическом поле.

**Тема 3.1** *Подготовка к семинару-круглому столу (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).*

Примерные вопросы семинара:

1. Тензор упругих постоянных и упругая деформация. Пластичность кристаллов. Предел текучести. Упрочение. Внутреннее трение.

**Тема 3.2** *Подготовка к семинару-дискуссии (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).*

Примерные вопросы семинара:

1. Оптические спектры молекулярных кристаллов. Экситонное поглощение. Правило Урбаха. Механизмы и эффективность переноса энергии. Спектры и квантовый выход люминесценции.

**Тема 3.3** *Подготовка к семинару-дискуссии (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).*

Примерные вопросы семинара:

1. Диамагнетизм свободного электронного газа. Спиновый парамагнетизм. Закон Кюри.

2. Ферромагнетизм. Молекулярное поле Вейсса. Обменное взаимодействие. Ферромагнитные домены. Энергия анизотропии. Доменная стенка. Антиферромагнетики. Ферриты.

**Тема 4.1** *Подготовка к семинару-круглому столу (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).*

Примерные вопросы семинара:

1. Автоэлектронная эмиссия. Теория Фаулера-Норгейма. Распределение электронов по энергиям. Особенности автоэлектронной эмиссии полупроводников. Автоэлектронная микроскопия. Взрывная эмиссия электронов. Эмиссия электронов из системы металл- диэлектрик-металл. Сканирующая туннельная микроскопия. Микроскоп атомных сил.

**Тема 4.2** Подготовка к семинару-круглому столу (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).

Примерные вопросы семинара:

1. Фотоэлектронная эмиссия. Теория Фаулера. Взаимодействие света с веществом. Особенности фотоэлектронной эмиссии с полупроводников и щелочно-галлоидных кристаллов, экситоны. Фотоэлектронная спектроскопия.

**Тема 4.3** Подготовка к семинару-дискуссии (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).

Примерные вопросы семинара:

1. Вторично-электронная эмиссия. Механизмы взаимодействия электронов с твердым телом. Упругое и неупругое рассеяние, длина свободного пробега. Распределение вторичных электронов по энергии. Дифракция электронов. Характеристические потери энергии электронов. Электронная Оже-спектроскопия. Спектроскопия потенциалов появления.

**Тема 5.1** Подготовка к семинару-круглому столу (1 час). Подготовка к экзамену (1 час).

Примерные вопросы семинара:

1. Электронные состояния на поверхности. Поверхностные состояния. Поверхностная зона Бриллюэна.

2. Пространственное распределение потенциала и электронной плотности на поверхности металла, осцилляции Фриделя. Работа выхода и ее составные части.

**Тема 5.2** Подготовка к семинару-дискуссии (2 часа). Подготовка к экзамену (2 часа).

Примерные вопросы семинара:

1. Физическая природа и описание области пространственного заряда в полупроводниках на границах раздела. Распределение электрических зарядов в приповерхностной области полупроводников. Поверхностная емкость полупроводников.

2. Кинетические и неравновесные явления в полупроводниках с учетом поверхности и границ раздела. Контакт металл-полупроводник, гомопереходы, гетеропереходы. Полевые эффекты в полупроводниках и их использование для исследования поверхностных явлений.

**Тема 6.1.** Подготовка к семинару-круглому столу (2 часа). Подготовка к экзамену (2 часа).

Примерные вопросы семинара:

1. Вынужденная анизотропия во внешних электрических полях. Электрическое двойное лучепреломление газов и жидкостей, способы его наблюдения, константа Керра. Классическая и квантовая теории эффекта

Керра. Эффект Фойхта и его связь с эффектом Керра. Электрооптические эффекты в растворах макромолекул.

2. Способы расчета стационарного ЭДЛ жесткоцепных полимеров в слабом поле. Расчет нестационарного ЭДЛ при включении поля. Расчет нестационарного ЭДЛ при выключении поля. ЭДЛ в слабом синусоидальном поле. Электрические эффекты в коллоидных дисперсных системах. Расчет стационарных электрооптических эффектов дисперсных систем в поле произвольной величины. Влияние полидисперсности на электрооптические эффекты.

**Тема 6.2 Подготовка к семинару-дискуссии (2 часа). Подготовка к экзамену (2 часа).**

Примерные вопросы семинара:

1. Основные свойства и методы получения дисперсных систем. Термодинамика пограничного слоя. Основные электрокинетические явления. Модель Гельмгольца исследуемых веществ.

2. Динамический ЯМР. ЯМР-релаксация в жидкостях: основы теории, связь с молекулярной подвижностью.

**Самостоятельная подготовка по темам:**

### **Раздел 1. Энергетический спектр кристаллов**

Описание энергетического состояния кристалла при помощи газа квазичастиц. Примеры квазичастиц: фононы, магноны, экситоны, плазмоны и р. Электроны в металлах как квазичастицы. Квазиимпульс. Закон дисперсии. Теорема Блоха. Граничные условия. Плотность состояний. Статистика газа квазичастиц: бозоны и фермионы. Взаимодействие квазичастиц.

Электронные состояния в кристаллах. Одноэлектронная модель.

Приближение сильной и слабой связи. Зонная схема и типы твердых тел.

Вырожденный электронный газ. Статистика электронного газа в полупроводниках и металлах. Электронная теплоемкость. Поверхность Ферми. Тензор эффективных масс. Электроны и дырки. Циклотронная масса.

Приповерхностная область кристалла. Поверхностные дефекты и уровни Тамма. Зарядение поверхности, приповерхностный загиб зон, контактный потенциал. Уровень Ферми в объеме и на поверхности.

Молекулярные кристаллы. Энергетическая структура ионных состояний в ОМК. Экситоны Френкеля и экситоны переноса заряда. Комплексы переноса заряда и ион-радикальные соли.

Квазидвумерные системы в полупроводниках: гетероструктуры. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структуры). Размерное квантование электронного спектра.

Электронный спектр и плотность состояний электронов в квантующем магнитном поле. Эффект де Гааза-ван-Альфена. Спектр квазидвумерных электронов в поперечном квантующем магнитном поле.

### **Раздел 2. Электронные кинетические свойства твердых тел**

Металлы с большой длиной пробега электронов. Аномальный скин-эффект. Циклотронный резонанс и размерные эффекты. Проникновение электромагнитного поля в металл. Голиконы.

Диэлектрики. Электрострикция и пьезоэлектричество. Пироэлектрики и сегнетоэлектрики. Электрический гистерезис. Аномалии физических свойств сегнетоэлектриков в области фазовых переходов.

### **Раздел 3. Механические, оптические и магнитные свойства твердых тел**

Механизмы поглощения фотонов. Поглощение свободными носителями. Решеточное поглощение. Межзонные прямые и не прямые переходы, правила отбора.

Экситоны. Спектры собственного поглощения, межзонная (комбинированная) плотность состояний, сингулярности Ван-Хова. Экситонные эффекты в оптических спектрах.

Несобственное поглощение в твердых телах. Поверхностное поглощение. Внутрицентровые переходы. Фотоионизация дефектов.

Многофотонные процессы. Комбинационное рассеяние света в кристаллах. Поглощение связанными носителями.

Люминесценция. Времена жизни возбуждений. Флуоресценция. Безызлучательные переходы. Квантовый выход люминесценции. Люминесценция кристаллов. Экситонная люминесценция. Межзонная люминесценция. Рекомбинационная люминесценция. Люминесценция с участием дефектов. Люминесценция связанных экситонов. Внутрицентровая люминесценция. Туннельная люминесценция. Кооперативная люминесценция.

Электронный газ во внешнем постоянном магнитном поле. Циклотронный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

### **Раздел 4. Эмиссионные явления в твердых телах**

Модель Зоммерфельда для металла. Теория термоэлектронной эмиссии Ричардсона. Влияние электрического поля на термоэлектронную эмиссию. Особенности термоэлектронной эмиссии полупроводников.

Поверхностная ионизация. Уравнение Саха-Ленгмюра. Влияние электрического поля на поверхностную ионизацию. Десорбция полем. Автоионная микроскопия.

Ионно-электронная эмиссия, кинетическая и потенциальная. Рассеяние ионов. Эффект затенения. Вторичная ионная масс-спектрометрия.

### **Раздел 5. Электронные и атомные явления на поверхности и на межфазовых границах твердых тел**

Атомная структура поверхности. Релаксация, реконструкция, их механизмы. Атомное строение поверхности полупроводников. Связь физических свойств поверхности с ее структурой.

Гетерогенные системы. Межфазная граница. Явления на границе раздела фаз твердое тело-газ. Физическая и химическая адсорбция. Межмолекулярные взаимодействия при физической адсорбции. Моно-и полимолекулярная адсорбция. Модель адсорбции Ленгмюра. Адсорбционно-десорбционное равновесие. Теплота физической адсорбции. Зависимость теплоты адсорбции от молекулярного веса адсорбата.

Типы химической связи при хемосорбции. Энергия активации и теплота адсорбции. Диссоциативная адсорбция. Потенциальные поверхности при хемосорбции. Хемосорбция на неоднородной поверхности.

Адсорбция. Теория Брунауэра-Эммета-Тейлора. Электронные состояния адатома. Изменение работы выхода при адсорбции, дипольная модель, модель Лэнга. Атомная структура адсорбированного слоя. Взаимодействие адсорбированных частиц. Десорбция, поверхностная диффузия.

Понятия каталитической реакции и катализатора. Гомогенные и гетерогенные каталитические реакции. Активность и селективность катализаторов. Общие теории и модели катализа. Стадийные механизмы и компенсация энергии разрыва связей в гетерогенном катализе. Неравновесные процессы.

Классификация фотостимулированных процессов на поверхности. Фотокаталитические процессы. Фотокатализаторы. Фотокаталитические реакции в гетерогенных системах газ-твердое тело и жидкость-твердое тело.

## **Раздел 6. Физика дисперсных систем**

Электрооптические методы определения анизотропии поляризуемости и постоянного дипольного момента коллоидных частиц.

Физические основы ЭПР. ЭПР радикалов и ионов металлов. СТС. Спиновый обмен. Применение ЭПР для исследования вещества в конденсированном состоянии.

Электрические и магнитные свойства кристаллов и их связь с параметрами магнитного резонанса (ЯМР, ЯКР, ЭПР). Диэлектрики, полупроводники, металлы, сверхпроводники. Пара- и пироэлектрики. Ферро-, ферри- и антиферромагнетики. Фазовые переходы и их исследование методами магнитного резонанса.

Особенности ЯМР в парамагнитных соединениях: парамагнитный сдвиг, ускорение релаксации, найтовский сдвиг. Новые возможности, возникающие в парамагнитных соединениях для анализа строения и динамики жидкостей и твердых тел. Основные представления об особенностях ЯМР в магнитоупорядоченных веществах.

Проявление электронного строения молекул в спектрах магнитного резонанса (ЯМР, ЯКР, ЭПР). Типы химической связи в молекулах.  $sp^o$ -гибридизация. Конформации молекул. Изомеры.

### **5.2. Контрольные работы и промежуточное тестирование**

Не предусмотрены.

### **5.3. Поддержка самостоятельной работы:**



Литература и источники для обязательного прочтения. Регулярные консультации. Интернет-ресурсы: <http://www.elibrary.ru>, <http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index>, <http://journals.ioffe.ru>.

#### **5.4. Тематика рефератов**

Не предусмотрены.

#### **5.5. Промежуточный контроль**

*Вопросы к зачету:*

1. Статистика газа квазичастиц: бозоны и фермионы
2. Колебания решетки - фононы. Акустическая и оптическая ветви колебаний.
3. Электронные состояния в кристаллах. Одноэлектронная модель.
4. Приближение сильной и слабой связи. Зонная схема и типы твердых тел.
5. Статистика электронного газа в полупроводниках и металлах.
6. Поверхность Ферми. Тензор эффективных масс. Электроны и дырки. Циклотронная масса..
7. Зонная структура твердого тела и методы ее расчета. Влияние симметрии на зонную структуру твердого тела.
8. Метод ячеек.
9. Метод почти свободных электронов.
10. Метод ортогонализированных плоских волн.
11. Метод присоединенных плоских волн.
12. Метод функций Грина.
13. Метод псевдопотенциала.
14. Поверхностные дефекты и уровни Тамма.
15. Экситоны Френкеля и экситоны переноса заряда.
16. Квазидвумерные системы в полупроводниках: гетероструктуры. Структуры металл- диэлектрик- полупроводник (МДП-структуры). Размерное квантование электронного спектра.
17. Электронный спектр и плотность состояний электронов в квантующем магнитном поле. Эффект де Гааза-ван-Альфена. Спектр квазидвумерных электронов в поперечном квантующем магнитном поле.
18. Кинетическое уравнение. Электро- и теплопроводность. Времена релаксации. Механизмы рассеяния электронов. Рассеяние на примесях и дефектах. Электрон-фононное рассеяние.
19. Магнитосопротивление и эффект Холла.
20. Аномальный скин-эффект.
21. Циклотронный резонанс и размерные эффекты.
22. Аномалии физических свойств сегнетоэлектриков в области фазовых переходов..

23. Механизмы поглощения фотонов. Поглощение свободными носителями. Решеточное поглощение. Межзонные прямые и непрямые переходы, правила отбора.
24. Экситоны. Спектры собственного поглощения, межзонная (комбинированная) плотность состояний, сингулярности Ван-Хова. Экситонные эффекты в оптических спектрах.
25. Несобственное поглощение в твердых телах. Поверхностное поглощение. Внутрицентровые переходы. Фотоионизация дефектов.
26. Многофотонные процессы. Комбинационное рассеяние света в кристаллах. Поглощение связанными носителями.
27. Флуоресценция.
28. Экситонная люминесценция.
29. Межзонная люминесценция.
30. Рекомбинационная люминесценция.
31. Люминесценция с участием дефектов.
32. Оптические спектры молекулярных кристаллов. Экситонное поглощение. Правило Урбаха.

## **6. Рекомендуемая литература**

### **6.1. Основная литература**

1. Байков Ю. А. Квантовая механика: учеб. пособие / Ю.А. Байков, В.М. Кузнецов. — Москва: Издательство "Лаборатория знаний", 2015. — 294 с. — <https://e.lanbook.com/book/70719>
2. Блохинцев Д. И. Избранные труды. В 2 т. Т. 2: монография — Москва : Физматлит, 2009. — 740 с. <https://e.lanbook.com/book/48348>
3. Общие принципы квантовой теории поля: учеб. пособие / Н.Н. Боголюбов и др. — Москва: Физматлит, 2006. — 657 с. <https://e.lanbook.com/book/48239>
4. Демидович Б. П. Математические основы квантовой механики: учеб. пособие — Санкт-Петербург: Лань, 2005. — 200 с. <https://e.lanbook.com/book/604>
5. Дирак П. Собрание научных трудов. Т.1 Квантовая теория: монография — Москва: Физматлит, 2002. — 704 с. <https://e.lanbook.com/book/2137>
6. Кашурников В. А. Численные методы квантовой статистики: монография / В.А. Кашурников, А.В. Красавин. — Москва : Физматлит, 2010. — 628 с. <https://e.lanbook.com/book/2197>
7. Котельников В. А. Модельная нерелятивистская квантовая механика — Москва: Физматлит, 2008. — 70 с. <https://e.lanbook.com/book/48251>
8. Ландау Л. Д. Теоретическая физика Т.3. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Москва: Физматлит, 2001. — 808 с. <https://e.lanbook.com/book/2380>
9. Тимофеев В. Б. Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур: учеб. пособие — Санкт-Петербург: Лань, 2015. — 512 с. <https://e.lanbook.com/book/56612>

10. [Ансельм А. И.](#) Введение в теорию полупроводников : учебное пособие. - 3-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2016. - 624 с. <https://e.lanbook.com/book/71742> (20 экз)
11. Байков, Ю.А. Физика конденсированного состояния: учеб. пособие / Ю.А. Байков, В.М. Кузнецов. — Москва: Издательство "Лаборатория знаний", 2015. — 296 с. <https://e.lanbook.com/book/70766>
12. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах — Москва: Физматлит, 2013. — 288 с. <https://e.lanbook.com/book/91178>
13. Елифанов, Г.И. Физика твердого тела: учеб. пособие — Санкт-Петербург: Лань, 2011. — 288 с. <https://e.lanbook.com/book/2023>
14. Зегря Г.Г. Основы физики полупроводников: учеб. пособие / Г.Г. Зегря, В.И. Перель.— Москва : Физматлит, 2009. — 336 с. <https://e.lanbook.com/book/2371>
15. Перлин Е.Ю. Физика твердого тела. Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов: учеб. пособие / Е.Ю. Перлин, Т.А. Вартамян, А.В. Федоров. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2008. — 216 с. <https://e.lanbook.com/book/43431>
16. Шалимова К.В. Физика полупроводников: учеб. — Санкт-Петербург: Лань, 2010. — 384 с. <https://e.lanbook.com/book/648>
17. [Демиховский В. Я.](#), Вугальтер Г. А. Физика квантовых низкоразмерных структур. - М. : Логос, 2000. - 248 с. (5 экз)
18. [Гинзбург И. Ф.](#) Введение в физику твердого тела. Основы квантовой механики и статистической физики с отдельными задачами физики твердого тела: учебное пособие / И. Ф. Гинзбург. - СПб. : Лань, 2007. - 544 с. (20 экз)
19. Жуковский В. Ч., Кревчик В. Д.; Семенов М. Б.; Тернов А. И., Маргулис В. А. Квантовые эффекты в мезоскопических системах: учеб. пособие. - М.: Физический факультет МГУ, 2005 - Ч.2: Мезоскопика конденсированного состояния. Транспортные и магнитооптические свойства наноструктур. - 148 с. (5 экз)
20. Жуковский В. Ч., Кревчик В. Д.; Семенов М. Б.; Тернов А. И. Квантовые эффекты в мезоскопических системах: учеб. пособие. - М.: Физический факультет МГУ, 2002 - Ч.1: Квантовое туннелирование с диссипацией. - 108 с. (3 экз)
21. [Кревчик В. Д.](#) Введение в полупроводниковую наноэлектронику: учеб. пособие / Пенз. гос. ун-т. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. - 96 с. (20 экз)
22. Овчинников А.А. и др. Принципы управляемой модуляции низкоразмерных структур: монография / - М. : УНЦ ДО, 2003. - 510 с. (2 экз)
23. [Кревчик В. Д.](#) Метод потенциала нулевого радиуса в физике низкоразмерных систем: монография / В. Д. Кревчик, А. Б. Грунин ; Пенз. гос. ун-т. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. - 348 с. (50 экз)
24. Грунин А. Б. Магнитооптические эффекты в многоямных квантовых структурах с примесными центрами атомного типа : учебное пособие / под ред. В. Д. Кревича ; Пенз. гос. ун-т. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. - 124 с. (70 экз)

25. Перлин Е.Ю. Физика твердого тела. Оптика полупроводников, диэлектриков, металлов: учеб. пособие / Е.Ю. Перлин, Т.А. Вартамян, А.В. Федоров. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2008. — 216 с. <https://e.lanbook.com/book/43431>

## 6.2 Дополнительная литература

1. Белинский А. В. Квантовые измерения: учеб. пособие — Москва: Издательство "Лаборатория знаний", 2015. — 185 с. <https://e.lanbook.com/book/66337>
2. Делоне Н. Б. Квантовая природа вещества — Москва: Физматлит, 2008. — 208 с. <https://e.lanbook.com/book/2726>
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 2010. (3 экз)
4. Редьков В. М. Тетрадный формализм, сферическая симметрия и базис Шредингера — Минск: 2011. — 339 с. <https://e.lanbook.com/book/90324>
5. Колобов М. И. Квантовое изображение: монография — Москва: Физматлит, 2009. — 524 с. <https://e.lanbook.com/book/48273>

## 6.3 Интернет-ресурсы

1. [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
2. [www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index)
3. [www.journals.ioffe.ru](http://www.journals.ioffe.ru)

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Квантовая теория»

Для освоения данной дисциплины необходимы:

– мультимедийные средства обучения (компьютер и проектор; ресурсы Интернета);

– электронные презентации по теме курса в формате программных приложений MS Office Power Point и MS Office Word. Демонстрация ресурсов Интернет (избранных сайтов) по теме лекций и лабораторных занятий, необходим браузер MS Internet Explorer 6.0 и выше. Для подготовки материала к занятиям требуется программный пакет MS Office 2003 и выше, программы для расчетов Mathcad 11.0 и выше, Maple 9.0 и выше, Mathematica 5.0 и выше.

**Сведения о переутверждении программы на очередной учебный год  
и регистрации изменений**

Учебный год	Решение кафедры (№ протокола, дата, подпись зав. кафедрой)	Внесенные изменения	Номера листов (страниц)		
			заменен- ных	новых	аннулиро- ванных
2015/16	М. У 1 2.09.15 <i>li</i>				
2016/17	М. У 1 9.09.16 <i>li</i>				
2017/18	М. У 1 14.09.17 <i>li</i>				